

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 20051302468

UDC _____

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

基于能量函数的非线性励磁控制器
的设计与仿真

Design and Simulation of the Nonlinear Excitation
Controller Based on Energy Function

叶 和 龙

指导教师姓名: 彭 侠 夫 教 授

专 业 名 称: 检测技术与自动化装置

论文提交日期: 2008 年 4 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密 (), 在 年解密后适用本授权书。

2、不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名:

日期: 年 月 日

导师签名:

日期: 年 月 日

摘 要

电力系统在国民生活和生产中起着举足轻重的作用。电力系统稳定是电网安全运行的关键，一旦遭到破坏，必将造成巨大的经济损失和灾难性的后果，世界各国不乏惨痛教训之例。随着我国远距离输电系统的不断发展和高压电网的建成及大容量发电机组在电网中不断的投入运行，如何保持电力系统稳定、可靠地运行，是一个突出的问题。同步发电机励磁系统对提高电力系统的可靠性和稳定性起着重要作用。在诸多改善发电机稳定性的措施中，提高励磁系统的控制性能，被公认为是最有效和最经济的措施之一。

电力系统是一个具有强非线性行为的复杂系统，并含有很多的未建模动态和不确定性。当系统的运行点改变时系统的动态特性会显著改变。线性控制器很难保证电力系统的控制要求，因此非线性控制在电力系统中的应用研究越来越受到人们的关注。

本论文以基于能量函数的非线性励磁控制器的设计为主要内容。首先进行电力系统稳定性分析以及励磁系统对电力系统稳定性的影响。在分析 Hamilton 能量函数理论基础和同步发电机实用数学模型的前提下，针对单机—无穷大系统，应用能量函数理论构造 Hamilton 能量函数并设计出发电机励磁系统控制律。并对能量函数进行整形使所设计控制器的吸引域扩大，控制性能优化。很好地限制了用线性控制所产生的近似误差。最后，应用 Matlab7.1/Simulink 对用 Hamilton 能量函数和能量函数整形方法所设计的控制器与 PID 控制器进行仿真和比较。

关键词： 励磁系统；能量函数；动态仿真

ABSTRACT

Power system is playing an important role in people's daily life and producing. The stability of the power system is the key of the power net's safe running. If destroyed, it would make large economic loss and disastrous result. The examples exist all over the world. With the continuous development of long distance translation system, complement of high voltage power net and continuous additional running in power net of large volume generator team, it is the obvious problem that how to keep stable and safe running for power system. Synchronous generator's excitation system is playing an important part in terms of improving the stability and safety of the power system. Improving the control capability of excitation system is regarded as one of the most effective and economic methods.

Power system is a complicated system that has strong nonlinear behaviour, including much uncompleted dynamic model and uncertainty. When the system running point change, the dynamic character would make obvious change accordingly. Linear controller is hard to guarantee the power system's control inquirement. So, people pay more attention to the nonlinear control's application and research of the power system.

The main content of the thesis is about the design of nonlinear excitation system controller based on energy theory. It is the first thing to explain the stability of power system and the influence which the excitation system work on the stability. On the basis of explaining Hamilton energy function theory and work out the mathematics model of the synchronous generator, it is time to create Hamilton energy function and design out the controlling law in terms of one generator-infinity system. Then, it is necessary to rectify the energy function in order that the stability area would be larger and the controlling quality would be better. The error of the linear controlling is controlled to some degree. At last, compare the simulink result of the controller designed by the method of energy function with the PID controller by using Matlab7.1/Simulink.

Keywords: Excitation System; Energy Function; Dynamic Simulation

目 录

第一章 绪论	1
1.1 本课题研究的目的和意义	1
1.2 国内外励磁控制器的发展与研究现状	2
1.2.1 励磁控制器的发展	2
1.2.2 励磁控制器的研究现状	4
1.3 Hamilton 能量函数在电力系统中的应用	4
1.4 本课题的主要工作	6
第二章 励磁系统及其对电力系统稳定的影响	7
2.1 励磁系统概述	7
2.2 电力系统稳定性分析	9
2.2.1 电力系统稳定的分类	10
2.2.2 电力系统静态稳定分析	12
2.2.3 电力系统暂态稳定分析	17
2.3 励磁控制对系统稳定的影响	24
2.3.1 励磁调节对静态稳定的影响	24
2.3.2 励磁调节对暂态稳定的影响	25
2.4 本章小结	28
第三章 Hamilton 能量函数理论基础	29
3.1 稳定性的判定条件	29
3.1.1 Lyapunov 稳定	29
3.1.2 La Salle 不变集原理	31
3.2 无源性与耗散性	32
3.2.1 无源性与稳定性	32
3.2.2 耗散性判定条件	33
3.3 Hamilton 能量函数理论	33
3.4 本章小结	37
第四章 励磁控制系统的设计	38

4.1 同步发电机的实用数学模型·····	38
4.2 励磁控制器的设计·····	45
4.2.1 基于常规哈密尔顿函数的励磁控制器设计·····	45
4.2.2 利用能量函数整形设计励磁控制器·····	48
4.3 吸引域的分析与比较·····	53
4.4 本章小结·····	54
第五章 励磁控制器的仿真研究 ·····	55
5.1 Matlab 简介·····	55
5.2 仿真模型的建立·····	57
5.2.1 常规 PID 励磁控制系统的建立·····	57
5.2.2 非线性励磁控制系统的建立·····	59
5.3 仿真研究·····	61
5.3.1 小扰动实验·····	62
5.3.2 大扰动实验·····	65
5.4 仿真结果分析与比较 ·····	67
5.5 本章小结 ·····	70
总结与展望 ·····	71
参考文献 ·····	73
攻读硕士学位期间发表的论文 ·····	76
致谢 ·····	77

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 The Intention and Purpose of the Research.....	1
1.2 Status and Foreground of Excitation Controller.....	2
1.2.1 The Foreground of Excitation Controller.....	2
1.2.2 The Research Status of Excitation Controller	4
1.3 Application of Hamilton Energy Function in Power System.....	4
1.4 Contents of this Paper.....	6
Chapter 2 Influence of Excitation System in System Stability. 7	7
2.1 Introduction of Excitation System.....	7
2.2 Analysis of Power System Stability.....	9
2.2.1 Sorts of Power System Stability.....	10
2.2.2 Analysis of Power System Static Stability.....	12
2.2.3 Analysis of Power System Dynamical Stability.....	17
2.3 Influence of Excitation Control in System Stability.....	24
2.3.1 Influence of Excitation Control in Static Stability.....	24
2.3.2 Influence of Excitation Control in Dynamical Stability...	25
2.4 Summary of the Chapter.....	28
Chapter 3 Basis of Hamilton Energy Function Theory	29
3.1 Determinant Terms of Stability.....	29
3.1.1 Lyapunov Stability.....	29
3.1.2 Principle of La Salle Invariability.....	31
3.2 Passivity and Dissipativity	32
3.2.1 Passivity and Stability.....	32
3.2.2 Determinant Terms of Dissipativity.....	33
3.3 Hamilton Energy Function Theory.....	33
3.4 Summary of the Thapter.....	37
Chapter 4 Design of Excitation Control System.....	38

4.1	Math Model of Synchronous Generator.....	38
4.2	Design of Excitation Controller.....	45
4.2.1	Design of Excitation Controller Based on Hamilton . .	45
4.2.2	Design Using Hamilton Function Retification.....	48
4.3	Analysis and Comparison of Stability Range.....	53
4.4	Summary of the Chapter.....	54
Chapter 5	Simulation of Excitation Controller.....	55
5.1	Introduction of Matlab	55
5.2	Creating of Simulation Model.....	57
5.2.1	Creating of PID Excitation Control System.....	57
5.2.2	Creating of Nonlinear Excitation Control System.....	59
5.3	Simulation Research	61
5.3.1	Experiment of Small Disturbance.....	62
5.3.2	Experiment of Large Disturbance.....	65
5.4	Analysis and Comparison of Simulation Result.....	67
5.5	Summary of the Chapter.....	70
Conclution and Prospect	71
Bibliography	73
Published Papers of Author.....		76
Thanks	77

第一章 绪论

1.1 本课题研究的目的是和意义

同步发电机励磁控制是保证发电机和电力系统安全稳定运行和改善电力系统动态品质的一项基本措施。随着电力系统的发展,对发电机励磁提出了更高的要求。除了维持发电机电压水平,合理分配并联机组的无功功率外,还要求励磁控制系统能对电力系统的静态和暂态稳定起作用。国内外的研究和实践证明,励磁控制系统不仅能提高电力系统稳定运行极限,而且通过附加控制,能抑制低频振荡和次同步振荡,对电力系统稳定运行有显著效果。因此,研究和开发性能优良的同步发电机励磁控制系统,一直是各国学者和工程技术人员的一项重要工作。

随着电力系统规模的不断扩大,运行方式也日益复杂。我国已经形成几个区域电网,如东北电网、华北电网、华中电网等等。为了更加经济和安全的运行,现在正努力将这些电网通过联络线连成统一的大电力系统^[1]。再者,我国现在正在大力开发西部,必然会出现许多大型水电站,大容量、长距离输配电系统的广泛采用,使电力系统的安全稳定运行变得越来越重要。多年来,国内外电力系统由于稳定性的破坏,曾发生多次大面积停电事故,给国民经济带来巨大损失,社会影响极大^[2]。

提高电力系统稳定运行有许多方法,如改善输电网结构;汽轮机快关技术;减少发电机和变压器电抗;采用快速励磁等等。实践证明,采用控制发电机组的方法比其它方法具有明显好处,按效益投资比及易于实现来说,励磁控制又是最好的方法,因此有的国家将其列为基本措施^[3]。美国电力系统专家 C.Concordia 曾指出,“快速励磁及其控制”为电力系统稳定分析开辟了一个全新的方向^[4]。

60年代后期到80年代初,我国投入运行的100MW到300MW的汽轮发电机大量采用了三机励磁系统。经过二、三十年的运行,这些励磁装置元件老化,性能不稳定,已不能满足现代电力系统的需要,改造任务变得十分迫切。因此,研究和推出简单可靠、性能优良、价格低廉的励磁控制系统,不仅具有重要的理

论意义，也同样具有现实意义和经济意义。

1.2 国内外励磁控制器的发展与研究现状

随着控制理论不断发展,在实践中不断有新的理论与方法应用于励磁调节这一领域中,取得了不错的控制性能。现代大型同步发电机励磁控制的主要目标包括:高精度的电压调节功能、机组无功功率分配功能、提供适当的人工阻尼、提高系统稳定性和传输功率的功能,其中稳定性主要指功角稳定性(包括静态和暂态稳定性)和电压稳定性。下面对励磁控制器的发展与研究现状作一阐述:

1.2.1 励磁控制器的发展

1. 线性传递函数数学模型上的单变量励磁控制器

自动调压器(AVR)体现了这一设计理论的励磁控制方式,它是对机端的反馈电压与额定值的偏差进行比例(P)或比例—积分—微分(PID)调节,它运用古典控制理论来确定控制器的参数。AVR的基本功能是进行电压调节和无功功率分配,还有助于改善发电机电压的暂态和静态稳定性。但是,PID调节主要是针对电压偏差信号而设计的,它所产生的超前相位频率未必与低频振荡频率相同,亦即未必能满足补偿负阻尼所需的相位^[5]。此外,PID调节方式对抑制系统低频振荡的作用是有限的^[6]。

2. AVR+PSS 励磁控制器

如前所述,正是由于AVR所存在的这些缺点,依照F.D.Demello和C.Concordia理论设计出的电力系统稳定器PSS(power system stabilizer)被广泛地应用于发电机的励磁系统。PSS是采用机端电压的频率 f ,或机组转速 ω ,或发电机电磁功率 P_e 作为辅助输入量的一种方式,用以抑制由于励磁系统和发电机绕组的滞后特性所产生的低频振荡,从而提高电力系统的暂态稳定性。PSS可以弥补AVR的负面作用这一点已被实践所证明,AVR+PSS这种励磁调节方式也在工程中得到了广泛应用。PSS是为了抑制低频振荡而设置的,也就是说,在发生低频振荡时,PSS才起作用,而在正常运行所发生的不是低频振荡时,PSS则不应起

作用,以避免扭振激化、汽轮机低压缸叶片断裂等负作用。在历史上曾多次出现过由于 PSS 的负作用而造成的事故。因此,在 PSS 装置中设置相应的闭锁环节以避免 PSS 的负作用是十分必要的。比如,GE 公司在以转速 ω 为信号的电力系统稳定器中附加了陷波器环节,以避免扭振激化。

3. 线性最优励磁控制器

上世纪六十年代以来,现代控制理论得到了不断的发展。最优控制理论是现代控制理论中一个发展比较完善、应用较为广泛的重要分支,其研究的中心问题是选择最优控制规律,以使得控制系统在特定指标下的性能为最优。早在 1970 年加拿大余耀南博士便率先对电力系统进行了线性多变量最优控制规律的研究。在国内,清华大学卢强院士在这一领域中也取得了丰硕的成果。线性最优控制方式的优点是使控制过程的偏差最小,达到终值的预期值时间最快,终值最优,控制能量最小。它利用电力网络结构与参数不变,负荷动力群动态模型可用恒定阻抗特性代替,在某一平衡点周围可进行线性化处理这三个假设,将问题归结为研究多输入多输出线性系统的最优控制问题。

4. 非线性最优励磁控制器

电力系统实际上是一个非线性的系统,上述的数学模型的建立均是将非线性的模型线性化后得出的,因此难免会发生精确度不够的问题。基于微分几何理论设计出的非线性最优励磁控制器,从理论上讲,应当具有更好的控制性能^[7]。然而遗憾的是,非线性最优励磁控制器却没能得到更好的控制性能。原因主要在于,对同步发电机单轴数学模型的假设偏离了实际;并且状态变量在选取上受到了限制。但是,针对非线性最优励磁控制器的研究依然在不断完善和发展。

5. 智能励磁控制器

智能励磁控制包括模糊逻辑励磁控制,基于规则(专家系统)的励磁控制,人工神经网络励磁控制以及基于遗传算法、自学习理论、迭代学习算法以及它们的某种结合的励磁控制,基本特点是不依赖于对象系统的精确数学模型,而是基于某种智能概念模型将控制理论和人的经验及直觉推理相结合,具有处理非线性、并行计算、自适应、自学习和自组织等多方面的能力和优点。目前,智能型励磁控制方式大多尚停留在仿真计算阶段,少数应用实例也仅仅是一些简单的实验性尝试,要推广其应用,还有大量的理论和实际工作要做。

6. 线性多变量综合励磁控制器

线性多变量综合励磁控制器是基于现代控制理论构成的多变量控制系统,可对励磁和调速器进行综合控制,目的是使发电机的励磁系统和调速系统集于一体。日本富士公司在此方面做了大量研究,取得了较好的控制性能。在线性多变量综合励磁控制器中,其反馈量包括发电机的机端电压 U_t 、电功率 P_e 、电流 I 、磁场磁通 Φ_f 、转速 ω 、功率角 δ 以及原动机状态变量接力器开度 P_m 、机械转矩 T_m 等。

1.2.2 励磁控制器的研究现状

早期电力系统控制器的设计主要是将非线性系统在运行点附近进行近似线性化后进行的。由于电力系统的强非线性特性,这种近似线性化的方法显然不能适应电力系统受到大扰动(如故障)后对暂态稳定性的要求。近年来,非线性系统理论在设计电力系统控制器中得到广泛运用。目前,非线性控制理论在电力系统的应用得到了大量的研究并取得了许多重要的研究成果。按方法主要分为:微分几何法^[8]、直接反馈线性化法^[9]、基于 Lyapunov 稳定性理论的控制方法、变结构控制方法、非线性自适应控制方法和逆系统法等。这些方法各有自己的优越性,在电力系统中成功的应用明显地提高了电力系统稳定性,对电力系统安全稳定运行起到了积极的作用。然而,上述方法基本都是基于线性化或以线性化为基础的方法。传统的基于某个运行点线性化模型设计的线性控制器在理论上只适用于电力系统运行点附近小范围内系统的静态稳定问题。而在暂态过程中,例如当系统受到大扰动时,系统的运行点将会发生较大的偏移,此时线性控制器的控制效果将不再能够保证电力系统的控制要求。另外,上述这些方法在设计中无法充分利用电力系统内部的非线性结构性质,设计出来的控制器比较复杂。当系统出现严重干扰需进行紧急控制时,上述方法设计的控制器是难以奏效的。而事实上,非线性系统的某些非线性特性对控制器的设计是有利的,因此,在设计中应该充分加以利用。近年来,控制界对 Hamilton 能量系统理论进行了广泛的研究^[10~14]。从能量的观点出发,利用 Hamilton 能量系统理论,避开构造 Lyapunov 能量函数的难点,更好地进行动态系统非线性稳定控制器的设计。

1.3 Hamilton能量函数在电力系统中的应用

电力系统与人民的生活息息相关,在国民经济发展中也举足轻重,人们对它的安全稳定运行提出了更高的要求。随着以大机组、超高压电网为特点的大规模电力系统的迅速发展,改善系统运行的安全稳定成为日益重要和紧迫的研究课题。电力系统是一个具有强非线性行为的复杂系统,并含有很多的未建模动态和不确定性,例如模型参数的摄动、外部干扰等的影响。当系统的运行点改变时(如负荷大幅度波动或发生严重故障时)系统的动态特性会显著改变。线性控制器很难保证电力系统的控制要求,因此非线性控制在电力系统中的应用研究越来越受到人们的关注。

近几年,Hamilton 控制方法在电力系统控制中逐步受到人们的重视,该方法在电力系统中的研究已取得了许多重要的研究成果。有的已经将单机一无穷大系统表示为广义哈密尔顿控制系统^[15]。王玉振等人针对电力系统的结构特点,提出了“预置反馈+平衡点调整”的方法有效地解决了多机电力系统耗散 Hamilton 实现这一难题^[16]。众所周知,电力系统是一个能量产生、传输和消耗的复杂系统,其能量平衡在整个系统的安全运行中起至关重要的作用。将能量函数作为 Lyapunov 函数进行控制设计是很自然的。该类系统在稳定性分析、镇定控制、 H_∞ 控制等问题中表现出明显的优越性。广义 Hamilton 控制系统不但为电力系统提供了一个恰当的数学描述。同时,也为电力系统提供了一个新的更为有效的控制途径。

在电力系统吸引域分析中,Hamilton 系统方法也提供了一种有效的手段。电力系统暂态稳定分析目前主要有两种方法^[17],即时域仿真法(又称逐步积分法),以及 Lyapunov 直接法(又称暂态能量函数法)。时域仿真法存在速度慢,不能给出稳定度的缺点。暂态能量函数法适用于较大的非线性系统,并且计算速度快,能给出稳定度。应用直接法分析电力系统的暂态稳定性存在以下两方面的问题^[18]: 1、模型问题,即应用直接法分析电力系统的暂态稳定性普遍局限于发电机采用经典模型,其中发电机励磁系统及其调节采用暂态电势 E_q' 恒定,负荷则

采用恒定阻抗模型；但在实际电力系统的暂态稳定性分析中，发电机励磁及其调节模型和负荷模型的精确度将直接影响暂态稳定性分析的结果。因此，研究电力系统较精确模型下的暂态能量函数对于准确分析电力系统的暂态稳定性将具有特别重要的意义。2、控制问题，即已有的暂态能量函数在分析电力系统暂态稳定性中不考虑任何控制的作用。基于能量的 Hamilton 控制方法为电力系统的吸引域分析提供了新的研究途径，这为系统的稳定性分析带来了极大的方便。

1.4 本课题的主要工作

目前，Hamilton 控制方法在电力系统中的应用主要是处理模型确定的情形。然而，电力系统是充满不确定因素的复杂系统，人们对于它的安全稳定性要求越来越高，要求设计的控制器更可靠、更合理，能够更好地解决电力系统的稳定性问题，以改善系统运行的安全稳定性。基于此，本课题的主要工作有以下几个方面：

- (1) 进行电力系统稳定性分析（包括静态稳定和暂态稳定），以及发电机励磁系统对电力系统稳定性的影响。
- (2) 在分析非线性能量函数理论的前提下，针对单机—无穷大系统，进行同步发电机实用数学模型的建立。然后，应用能量函数理论构造 Hamilton 能量函数并设计出励磁系统控制律，它是一个以发电机端电压 U_t 、输出有功功率 P_e 、发电机转速 ω 为反馈输入量，而以励磁电压为反馈输出量的闭环反馈系统。并分析能量函数整形前后的吸引域。
- (3) 根据所设计出的励磁系统控制律，应用 Matlab7.1/Simulink 设计励磁系统控制器，对电力系统在小干扰情况下（如原动机输入功率波动）和大干扰情况下（如输电线路短路）两种情况进行仿真。最后，把用能量函数设计的控制器和 PID 控制器的仿真结果进行分析和比较。并进行总结。

第二章 励磁系统及其对电力系统稳定的影响

2.1 励磁系统概述

供给同步发电机励磁电流的电源及其附属设备统称为励磁系统。

1. 同步发电机励磁系统的任务

同步发电机的运行特性与它的空载电动势 E_q 的值密切相关^[19~20]，而 E_q 又是发电机励磁电流的函数，改变励磁电流就可影响同步发电机在电力系统中运行特性。因此，对同步发电机的励磁进行控制，是对发电机运行施加控制的重要内容之一。

电力系统在正常运行时，发电机励磁电流的变化主要影响电网的电压水平和并列运行机组间无功功率的分配。在某些故障情况下，发电机端电压降低将导致电力系统稳定水平下降。为此，当系统发生故障时，要求发电机迅速增大励磁电流，以维持电网的电压水平及稳定性。可见，同步发电机励磁的自动控制在保证电能质量、无功功率的合理分配和提高电力系统运行的可靠性等方面都起着十分重要的作用。

同步发电机的励磁系统一般由励磁功率单元和励磁调节器两部分组成，如图 2-1 所示。励磁功率单元向同步发电机转子提供直流电流，即励磁电流；励磁调节器根据输入信号和给定的调节准则控制励磁功率单元的输出。整个励磁自动控制系统是由励磁调节器、励磁功率单元和发电机构成的一个反馈控制系统。

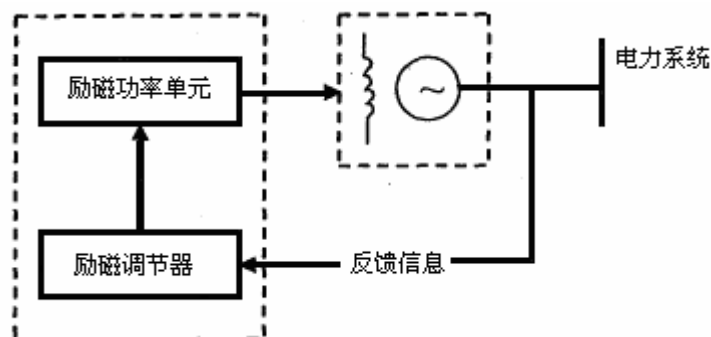


图 2-1 励磁自动控制系统构成框图

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库